

# 水の凍結膨張圧による PC 部材のシース周辺に与える影響

岩手大学 [院] ○西 弘\* 高知高専 近藤 拓也\*\*  
高知高専学 横飛 翔太\*\*\* 岩手大学 大西 弘志\*\*\*\*

## Influence to behavior around the sheath of the PC member by the freeze expansion pressure of the water

Hiroshi NISHI\*, Takuya KONDO\*\*, Syota YOKOTOB\*\*\* and Hiroshi ONISHI\*\*\*\*

\* Department of Civil and Environmental Engineering, Graduate School of Engineering, Iwate University  
4-3-5 Ueda, Morioka, Iwate, 020-8551, Japan

E-mail: nishi@coreit.co.jp

\*\* Department of Social Design Engineering, National Institute of technology, Kochi College  
200-1 Monobeotsu, Nangoku, Kochi, 783-8508, Japan

E-mail: tkondou@ce.kochi-ct.ac.jp

\*\*\* Department of Environmental Design Engineering, National Institute of technology, Kochi College  
200-1 Monobeotsu, Nangoku, Kochi, 783-8508, Japan

E-mail: z4840@gm.kochi-ct.ac.jp

\*\*\*\* Department of Systems Innovation Engineering, Faculty of Science and Engineering, Iwate University  
4-3-5 Ueda, Morioka, Iwate, 020-8551, Japan

E-mail: onishi@iwate-u.ac.jp

### 1 緒 言

近年、建設後数年が経過した PC 構造物に様々な劣化現象が確認されるようになり、玉越らりの道路橋の定期点検に基づく分析では、国内の PC 橋で最多架橋数であるポストテンション方式 T 桁橋 (以下、PCT 桁橋と称す) に認められている変状のうち、最も多く発生しているのが主桁下面の橋軸方向のひび割れであり、ウェブの主ケーブルに沿ったひび割れも発生頻度が高い結果が示されている。

これらの変状はグラウト充填不良や PC 鋼材腐食に起因する劣化の一つと考えられ、主な原因は、①シース内に滞水した水の凍結膨張圧、②プレストレスの横方向ひずみ、③アルミ粉 (混和剤) の膨張圧やグラウト注入圧、④コンクリートとグラウトの乾燥収縮と熱膨張係数との相違、⑤鋼製シースの腐食膨張圧などが単独あるいは複合的に形成し、顕在化するとされている<sup>2),3),4),5),6)</sup>。

Fig.1 に特別豪雪地帯の指定地域に架橋されている PCT 桁橋の損傷事例を示す。このように主桁下面とウェブ側面に遊離石灰を伴う PC ケーブルに沿ったひび割れが認められている。林ら<sup>2)</sup>がシース内に滞水した水が凍結膨張によって、ひび割れが発生することを定性的な実験により明らかにされているが、既設 PC 橋の健全性を判断するには、表面のひび割れ状況とシース周辺の内部ひずみの挙動を定量的に確認する必要がある。

一方、PC 構造物の生命線であるグラウト充填不良や PC 鋼材腐食状況の評価方法は、現行の定期点検要領には具体的に記されてなく、PC 構造物の健全性を外観上で診断することは極めて難しい<sup>7)</sup>。以上から、シース内に滞水した水の凍結膨張圧によるひずみ挙動を明らかにし、外観上への影響を確認するとともに、橋梁点検における PC 橋の健全性を評価する指標が必要であると考えられる。本稿では上記①、②に着目して、凍結とプレ

ストレスによる横方向ひずみの影響を確認するため、プレストレスを導入した小型供試体を用いて凍結試験および解析を行った。また、本試験で着目している同類のひび割れが生じている既設 PCT 桁橋を用いて、ひび割れ付近のコンクリートの性状を超音波法にて調査した。その結果について報告する。

### 2 試験概要

**2.1 試験要因** 試験要因を Table1 に示す。シースかぶり (以下「 $i$ 」と表記) とシース径 (以下「 $d$ 」と表記) は、林ら<sup>2),3)</sup>のひび割れ発生時の内圧と  $i/d$  の関係は  $i/d$  が 0.5 以下の場合には直線関係が認められない<sup>2),3)</sup>との研究成果を参考に  $i/d=0.75$  に設定した。シース径と PC 鋼材の関係は、実橋にあわせてシース空隙率 (シース断面積に占める PC 鋼材断面積の割合) を 29.0%に、プレストレスも実橋のプレストレス導入直後のコンクリート応力レベルとするため、緊張力を 75kN/ケーブルに設定した。シース中の充填材料は、シース内の充填の有無と材料による影響を確認するため、空 (0%)、グラウト

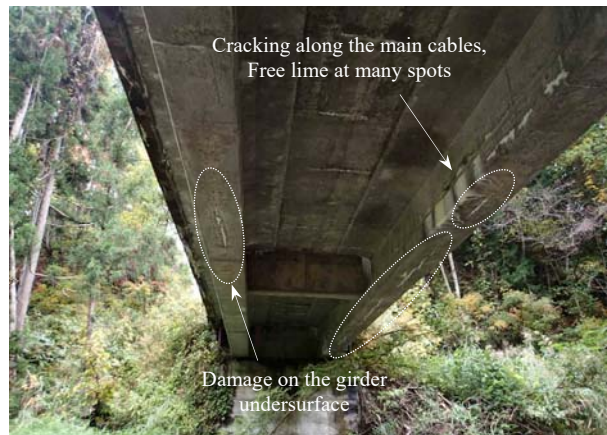


Fig.1 Damage found in the PCT bridge.

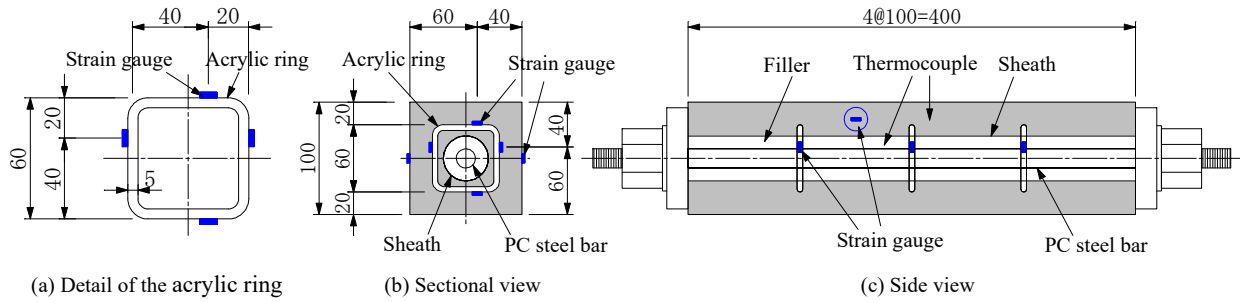


Fig.2 General view of the specimen.

充填度 100%, 水充填度 100%の 3 種類設定した. なお, 供試体は 1 要因につき 1 体とした.

**2.2 供試体諸元** 供試体一般図を Fig.2 に示す. 供試体は 100mm×100mm×400mm の角柱供試体とした. シースは, 直径φ40mm, 鋼板厚 0.25mm のものを供試体断面中心に配置し, 実橋で使用されている普通鋼板の鋼製シースを用いた. PC 鋼材は PC 鋼棒 SBPR1080/1230, φ23mm を使用した. コンクリートの配合は, 西ら<sup>9)</sup>, 鈴木ら<sup>8)</sup>の研究を参考に 1970 年代に架設された PCT 桁橋 (設計基準強度 40N/mm<sup>2</sup>) を想定して, 水セメント比を 40%とした. 供試体の製作順序はコンクリート打設後, 材齢 3 日でプレストレスを導入し, その後シース中に充填材 (グラウト, 水) を充填した. 内部ひずみを測定するためのひずみゲージの配置は, 鈴木ら<sup>8)</sup>の実験を参考に, 鋼製シース周辺にアクリル樹脂製リングを 3 断面設置し, 1 リングにつき上下辺, 側辺に 1 枚ずつの合計 4 枚と供試体軸方向に 1 枚, コンクリート側面 (表面) の供試体軸方向に両側 1 枚ずつ設置した. また, コンクリートとシース内部の温度を測定するため 1 箇所ずつ供試体の中央部に熱電対を配置した.

**2.3 試験方法** 部材軸方向にひび割れが発生する可能性がある一要因として, プレストレスによる横方向ひずみがある. この影響を確認するためコンクリート打設後から 10 日間の内部ひずみを測定した. 養生方法は材齢 3 日までを湿布養生とし, その後の材齢 3~10 日は空中養生とした. 凍結によるひずみ測定は, コンクリート材齢 105 日に開始した. 冷却装置は, 市販の冷凍庫 (庫内温度「-20~8°C」, 有効内容量 146ℓ) を使用した. 凍結融解温度とサイクルは, 道路橋示方書の支承移動量の設計に用いる温度変化「-5~35°C」を目安とし, Step-1 として「-5~25°Cを 3 サイクル」, Step-2 として「-15~25°Cを 3 サイクル」の 2 ステップに設定し, 供試体内部のコンクリート温度にて温度管理を行った.

**2.4 測定項目** コンクリート側面, アクリル樹脂製リングに取り付けたゲージにてひずみを, コンクリート内とシース内に配置した熱電対にて温度を測定した.

プレストレスによる横方向ひずみ測定は, コンクリート打設後から 27 時間は 1 分毎, 27 時間以降から 10 日目までは 30 分毎にひずみを測定した. PC 鋼棒を供試体の図心に配置しているものの, 製作誤差によるプレストレスの偏心の影響を考慮して, アクリル樹脂製リング (4

Table1 Examination parameter.

Parameter	Prestress	Filling rate		
		Grout	Water	
Specimen	Type-1	0kN	0%	0%
	Type-2	75kN	100%	0%
	Type-3	75kN	0%	100%
Temperature cycle	Step-1	-5°C~25°C 3 cycle		
	Step-2	-15°C~25°C 3 cycle		

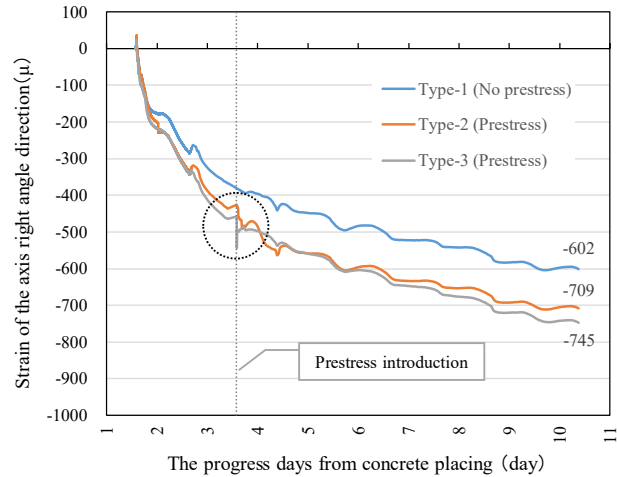


Fig.3 Right angle direction strain.

枚/リング) に貼り付けた 3 断面のひずみゲージで測定した値の平均値をプレストレスによる横方向ひずみとし, 10 日間の経時変化を観察した.

凍結によるひずみ測定は, 10 分毎にひずみを測定し, プレストレスによる横方向ひずみの測定と同様, アクリル樹脂製リングに貼り付けた 3 断面のひずみゲージの測定値の平均値を凍結によるひずみとし, 温度とひずみの関係を観察した.

### 3 試験結果

**3.1 プレストレスによる横方向ひずみ** プレストレスによる横方向ひずみの計測結果を Fig.3 に示す. 材齢 10 日の計測値では, プレストレス無しの Type-1 が -602 μ, プレストレス有りの Type-2, 3 が -709 μ と -745 μ であり, プレストレスの有無で 100~150 μ 差が生じていた. プレストレスによる横方向ひずみは Type-2, 3 供試体とも約 30~100 μ の範囲でひずみ変動は認められたが, 後述するひずみの解析値が 50 μ 程度の小さい値であるため, 解析

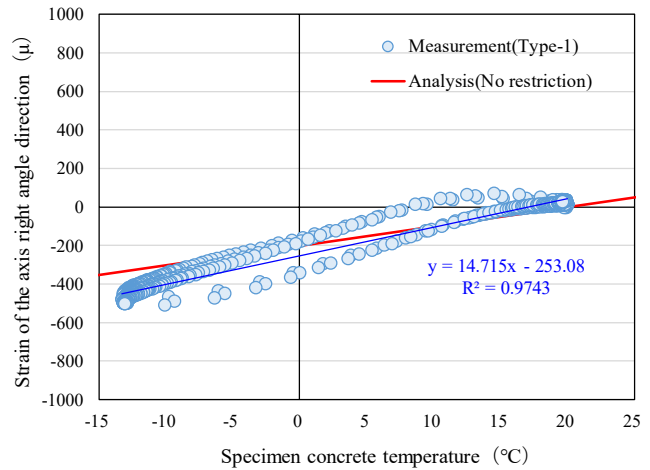
値との一致性を判断するまでには至っていない。林ら<sup>2,3)</sup>の研究では、シースの波打ちがPC鋼材の屈曲となり、プレストレスの腹圧力によってひび割れが生じる程度の2次的な横方向ひずみが発生することが実験的に確認されている。また、櫻井ら<sup>5)</sup>の解析的検討では、シースの波打ちのPC鋼材の屈曲による横方向ひずみの影響は、引張極限ひずみを超えるまでには至らないが、引張極限ひずみに対して約85%の影響があることを示している。今回の試験では文献2), 3), 5)とは少し異なるが、PC鋼材は彎曲の無い直線配置であり、プレストレスによる横方向ひずみの影響は、解析値で50 $\mu$ 程度(コンクリートのポアソン比0.2)であり、試験結果も約30~100 $\mu$ の小さい値であるため、プレストレスによる横方向ひずみが単独で、縦ひび割れを発生させるまでには至らない可能性を示した。

**3.2 凍結による横方向ひずみ** 凍結試験は材齢105日に開始し、Step-1(-5~25 $^{\circ}$ Cを3サイクル)、Step-2(-15~25 $^{\circ}$ Cを3サイクル)のひずみと温度の測定を行った。本試験ではアクリル樹脂製リングに貼り付けた3断面のひずみゲージで測定した値の平均値を凍結による横方向ひずみとした。試験の結果、温度サイクルStep-1とStep-2は同様な傾向であった。凍結による横方向ひずみと温度との関係の例としてStep-2の結果をFig.4を示す。横方向のひずみは、温度の低下に伴って圧縮側に、温度が上昇するに従って引張側に移行している。また、後述する解析値と試験値は同様な傾向を示しており、この傾向はType-1~3とも同様で、水の凍結によるシーソ膨張(内圧)の影響は認められなかった。同寸法の供試体、ひずみゲージ位置で実施された鈴木ら<sup>8)</sup>の電食試験では、シーソの腐食膨張圧(内圧)によって、横方向の引張ひずみが大きくなり、積算電流量(シーソの腐食)の増加に伴い供試体表面にひび割れが発生することを示しているが、本試験では供試体の温度の低下に従ってコンクリートの収縮(圧縮)ひずみが増加する傾向を示した。これはシーソ内の水が凍結することによって内圧は生じるが、コンクリート収縮による圧縮ひずみと比べ小さいことが考えられる。今回の凍結試験は、電食試験<sup>8)</sup>のシーソの腐食膨張圧とは逆の傾向を示し、シーソ膨張の内圧の作用による挙動とは異なったメカニズムであることがわかった。

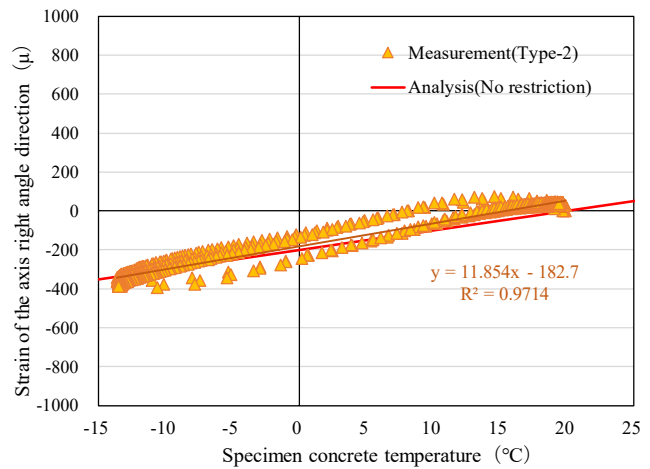
#### 4 弾性解析による検討

**4.1 検討方法** 凍結によるひずみ性状を把握する目的で3次元ソリッドモデルによる弾性温度解析を用いて、ひずみ、主応力の算出を行った。解析モデルはFig.2に示す供試体の形状寸法を再現して、部材軸方向、部材直角方向の対称性を考慮した1/4モデルとした。なお、シーソおよびアクリル樹脂製リングは部材として考慮した。解析に用いる材料特性値をTable2に示す。

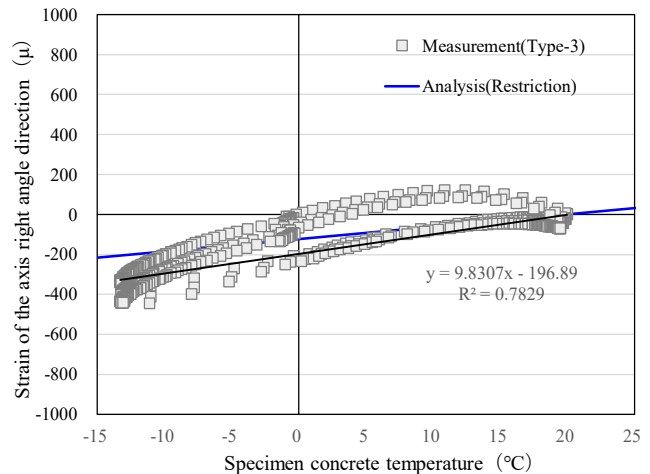
部材の拘束条件は、対称面で部材軸方向、部材軸直角方向を固定とした。載荷条件は緊張力75kN/ケーブルを支圧板面積(90mm $\times$ 90mm)の等分布荷重とした。温度



(a) Type-1



(b) Type-2



(c) Type-3

Fig.4 Right angle direction Strain (Step-2).

荷重は、室内温度約25 $^{\circ}$ Cから-5 $^{\circ}$ Cまでの冷却温度として-30 $^{\circ}$ Cの載荷とした。

検討内容は、前節3.2のType-3の試験結果から、シーソ内の水が凍結膨張(内圧)によって、シーソ周辺に引張ひずみの影響が生じると仮定していたが、本試験では、

その性状が認められなかったことから、シース内の水が凍結膨張することで、温度低下によるコンクリートの収縮ひずみをシースが拘束すると仮定し、シースの拘束の有無にて検討を行った。その結果、シース中が「空」でシースの拘束が無い場合、シースがコンクリートの収縮ひずみを拘束せず、コンクリートと一体となって収縮するため、Fig.6(a)に示すようにシース円周方向に引張力は発生しない。一方、シースの拘束が有る場合、Fig.6(b)のようにシース円周方向に引張力が発生する。シースの拘束条件によってシース周辺の応力分布が異なることから、シース側面方向の拘束の有無に着目して2ケースの検討を行った。

**4.2 検討結果** 凍結による横方向ひずみについて、供試体中央部における部材軸直角 (Y 軸) 方向の解析結果を Fig.7 (ひずみの表示がゲージ位置) に示す。シースの拘束が無しの場合、 $-30^{\circ}\text{C}$ の温度荷重を載荷すると、コンクリートとシースが一体となって収縮するため、断面均等に $-300\mu$ のひずみが発生する。一方、シースの拘束が有る場合、最小かぶりのシース外側付近のひずみがピークとなり、コンクリート表面に向かって圧縮ひずみが大きくなっている。なお、供試体のひずみゲージ位置では $-185\mu$ となる。このように、シース拘束の有無の違いで、シースのかぶり範囲のひずみ分布が異なることがわかる。プレストレスによる供試体中央部のひずみは、部材軸方向には断面均等に $-247\mu$ であり、部材軸直角方向は、コンクリート表面、ゲージ位置ともに $54\mu$ であった。

**4.3 ひび割れ発生メカニズムの考察** シース内に滞水した水が凍結すれば、その体積は9%膨張し、シースの膨張による内圧が生じてコンクリートにひび割れが発生すると仮定していた。しかし、試験と解析の結果から「凍結によるコンクリートの収縮ひずみ」と「シースの拘束」に関係があることがわかった。一方、Fig.1のような寒冷地区の既設 PCT 桁橋では、凍結融解は繰り返されており、実際に漏水、遊離石灰を伴うひび割れが、主桁下面、ウェブに認められている。以上のことから、凍結によるひび割れのメカニズムは、シース内の水が凍結膨張することで、シースがコンクリートの収縮ひずみを拘束し、シース外側の最小かぶり部分からひび割れが生じ、さらに、そのひび割れへの水の侵入と凍結融解の繰り返しのことによって、ひび割れがコンクリート表面へ進展していくと考えられる。このような事象を防ぐためには、シース内側、外側への水の侵入を防ぐことが、PCT 桁橋の長寿命化を図るための重要な対策であると言える。

## 5 既設 PCT 桁橋の調査事例

**5.1 調査概要** 本節では、凍結試験で着目した同類の変状が認められた既設 PCT 桁橋において、外観上の不具合部分のコンクリート性状を超音波法にて確認し、本橋のリスク評価を行ったので、その事例について紹介する。

本橋は1980年に建設された橋長25.5m、幅員10.0m、6主桁の1径間単純PCT桁橋である。外観変状の特徴は、支間中央部の主桁下面や下フランジ側面に遊離石灰を

Table2 Material properties.

Parameter	Unit	Concrete	Sheath	Acrylic ring
Elastic modulus	$\text{N}/\text{mm}^2$	31,000	200,000	3,200
Linear expansion coefficient	$\mu/^{\circ}\text{C}$	10.0	10.0	70.0
Poisson ratio	—	0.20	0.30	0.35

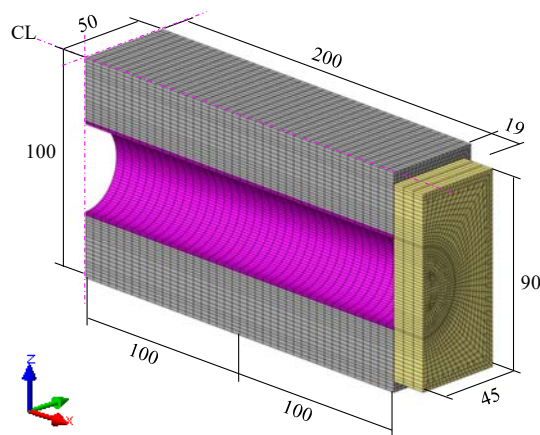


Fig.5 Analysis model.

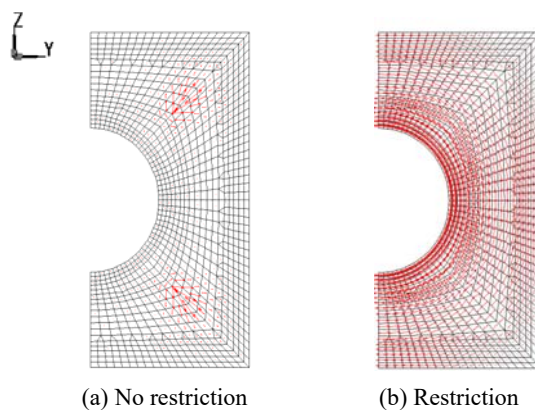


Fig.6 Vector diagram of the Principal Stress (Sectional View).

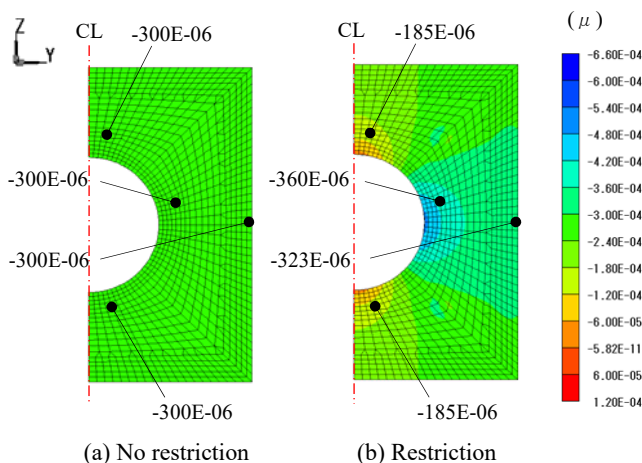


Fig.7 Strain of the Y-axis direction (Sectional View).

伴う橋軸方向ひび割れが点在し、特にG1~G6桁の全ての主桁下面においては、桁端部から約4~5mの主ケーブル曲げ上げ区間に、規則的に橋軸方向のひび割れが認め

Table3 Situation of the crack.

Girder No.	Crack			
	Number (Places)	Maximum width (mm)	Length (mm)	Depth (mm)
G1	1	0.60	1,200	70
G2	2	0.20	800	17
G3	2	0.70	970	44
G4	1	0.20	1,100	42
G5	1	0.40	1,500	49
G6	1	0.04	100	25

られている。また、ひび割れ付近には、漏水、遊離石灰、セメント水和物の溶出が認められている。この曲げ上げ区間のひび割れ状況を Table3 に示す。最大ひび割れ幅が G3 桁で 0.7mm、超音波法 Tc-T0 法<sup>9)</sup>で測定したひび割れ深さの最大値は 83mm であり、ひび割れ深さがシースに達するひび割れも一部認められた。

**5.2 調査方法** 主桁コンクリートの性状を確認するため、市販の超音波法測定システム (ESI-10, 周波数 28kHz) を用いて伝播速度を測定した。測定方法は、Case-1 として、主桁下フランジの両側側面が対面となるようセンサを挟んで配置する対称法と、Case-2 として、主桁下フランジ側面と主桁下面を対面とし、センサを挟んで斜めに透過させる斜角法の 2 種類の配置方法にて測定を行った。測定位置は橋軸方向ひび割れ区間 (Sec.2~7) と、外観上、健全な箇所 (Sec.1) を選定して、測定区間は桁端部から 3.8m~5.0m、測定間隔は 200mm ピッチ、1 主桁当たり 7 箇所とした。なお、コンクリート品質の評価方法は Table4 にて評価した<sup>9)</sup>。

**5.3 調査結果** Fig.7(a)に調査箇所、測定位置、ひび割れ状況 (例: G4) を、Fig.7 (b)に Case-1 対称法による調査結果を、Fig.7 (c)に Case-2 斜角法による調査結果を示す。すべての測点および Case-1, 2 の計測方法において 4000m/s 以上の伝播速度であり、Table4 の指標では

「Generally good (良)」以上の測定結果となった。超音波法はコンクリート内部に欠陥が存在する場合、発信した弾性波が欠陥部分を迂回して受信側に到達するため、伝播速度は低下するが、健全な箇所 (Sec.1) と外観上不具合な箇所 (Sec.2~7) を比較しても、大きな伝播速度に差は認められなかった。つまり、本橋において、外観上、漏水、遊離石灰、セメント水和物の溶出が認められるひび割れでも、コンクリート自体には著しい劣化は認められず、現時点では、健全箇所と同等な健全性 (密実性) を有していると考えられる。

**5.4 本橋のリスク評価** 本橋は 1980 年に建設された PCT 桁橋であり、約 37 年経過している。一般に建設時期が古い PC 橋は経年の影響を受け、古い橋梁ほど健全度が劣る傾向が示されている。また、グラウト技術が未熟であったことなどから、完全にグラウトが充填されていない可能性を有していると指摘されている<sup>7)</sup>。建設年次から本橋のリスクを評価すると以下の通りとなる。

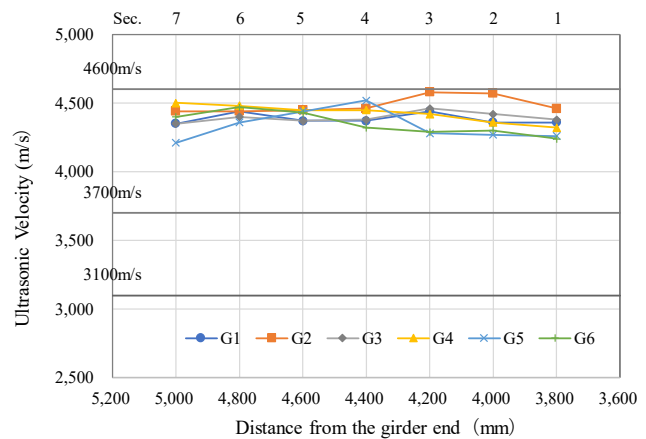
(1) グラウト材料のブリージング、グラウトの先流れ現象など、品質管理や施工管理が原因でグラウト充填

Table4 Quality and Ultrasonic Velocity<sup>9)</sup>.

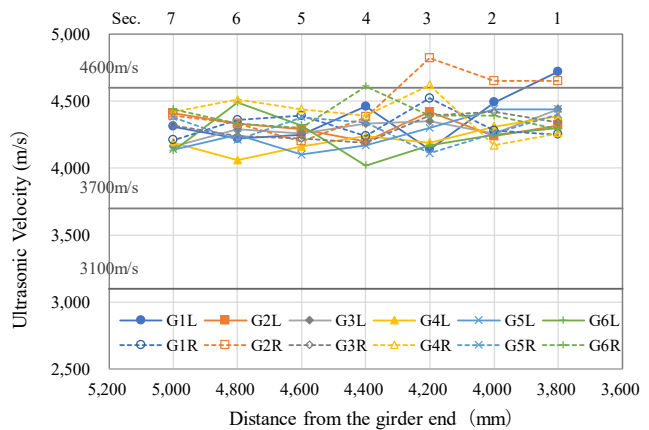
Ultrasonic Velocity (m/sec)	Quality
More than 4600	Excellent
3700~4600	Generally good
3100~3700	Questionable
2100~3100	Generally poor
2100 or less	Very poor



(a) The situation of the crazing (G4).



(b) Case-1: The symmetry method



(c) Case-2: The angle beam method

Fig.7 The result of a survey.

不足のリスクが高く、PC 鋼材が腐食し、破断した場合、著しく耐荷性能が低下する。

- (2) シースの空隙率によるグラウト充填不足や鋼製シースの腐食に対するリスクが高いため、シースへの水の侵入と凍結融解の繰り返しにより、耐久性が低下する（ひび割れが進展する）。
- (3) 上縁定着ケーブルを有する PCT 桁橋のため、その定着部からの水の侵入や定着部のあと処理の不具合などのリスクがあり、グラウト充填不足がある場合、PC 鋼材腐食に対して、耐荷性、耐久性が低下する。
- 上記を踏まえ、本橋では超音波法による調査の結果、現時点では、コンクリート自体は健全性を有していると考えられる。しかし、PC 構造物の生命線であるグラウト充填状況と PC 鋼材腐食状況が不明である。主桁下面に漏水、遊離石灰やセメント水和物の溶出を伴うひび割れが認められること、シース内側、外側の滞水が凍結融解の繰り返しによって、ひび割れがさらに進展する可能性があること、グラウト充填状況や PC 鋼材腐食状況を確認していないことなどから、リスク評価として PC 鋼材腐食に対してリスクを保有している。リスク低減のためには、経過観察を行うとともに、早期に PC ケーブルへの水の侵入を防ぐ対策と、グラウト充填、PC 鋼材腐食状況を把握するための調査を実施して、計画的な対策（防水工、ひび割れ補修）が必要であると言える。

## 6 結 言

プレストレスを導入した小型供試体を用いた凍結試験と既設 PCT 桁橋のひび割れ付近のコンクリート性状を調査した結果、以下のことが得られた。

- (1) PC 鋼材が直線配置の場合、プレストレスによる横方向ひずみの影響は、試験結果では約 30~100 $\mu$ 、解析値では約 50 $\mu$  のためコンクリートのポアソン比 0.2 程度であると考えられる。
- (2) 凍結による横方向ひずみの影響は、温度の低下に従ってコンクリートの収縮ひずみが増加する傾向を示した。これはシース内の水が凍結によって内圧は生じるが、コンクリート収縮による圧縮ひずみと比べ小さいことが考えられる。
- (3) 試験と解析の結果から「凍結によるコンクリートの収縮ひずみ」と「シースの拘束」に関係があることがわかった。
- (4) 凍結によるひび割れのメカニズムは、シース内の水が凍結膨張することで、シースがコンクリートの収縮ひずみを拘束し、シース外側の最小かぶり部分からひび割れが生じ、そのひび割れへの水の侵入と凍結融解の繰り返しによって、ひび割れがコンクリート表面へと進展すると考えられる。
- (5) 凍結試験で着目した同類の変状が認められた既設 PCT 桁橋において超音波法による調査した結果、外観上、漏水、遊離石灰、セメント水和物の溶出が認められるひび割れでも、コンクリート自体は著しい劣化は認められず、現時点では、健全箇所と同等レベルの伝播速度であった。

## 謝 辞

本研究にあたって、実橋のデータ収集には滑川町役場 江森徹氏、共和コンサルタント株式会社 海津誠昭氏に多大なご協力をいただいた。ここに謝意を表する。

## 参考文献

- 1) 玉越隆史, 大久保雅憲, 道路構造物群のマネジメント(管理)における点検データの活用~定期点検結果の分析から見た損傷発生・進行の特徴及び現有性能の指標化~, 土木技術資料 53-12, pp-18-21(2011).
- 2) 林正道, プレストレストコンクリート用グラウトに関する実験的研究, 土木試験所報告第 29 号(1962).
- 3) 林正道, PC げたの縦ひび割れとその防止, 北海道開発局土木試験所月報第 209 号(1970).
- 4) 小林崇, 中西昌洋, 北野勇一, 本間英貴, PCT 桁橋の桁腹部に発生したひび割れ原因に関する解析的検討, プレストレストコンクリート技術協会第 23 回シンポジウム論文集, pp.91-94(2014).
- 5) 櫻井義之, 國富康志, 谷口秀明, 木村嘉富, PCT 桁橋の桁下面に発生した縦ひび割れ原因に関する解析的検討, プレストレストコンクリート技術協会 第23回シンポジウム論文集, pp.85-90(2014).
- 6) 西弘, 近藤拓也, 中谷明登, 大西弘志, PC 部材のシースの腐食ひび割れに与えるシース径とかぶりの影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.39, No.2, pp.1267-1272(2017).
- 7) プレストレストコンクリート工学会, 既設ポストテンション橋の PC 鋼材調査および補修・補強指針(2016).
- 8) 鈴木佑典, 近藤拓也, 山本貴士, 宮川豊章, PC 部材中のシース腐食とコンクリート表面のひび割れに関する実験的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, pp1091-1096(2011).
- 9) 日本コンクリート工学協会, 超音波パルス伝播時間の標準測定方法(試案), JCI 基準集, pp.269-276(2004).
- 10) 佐々木慎一, 塚孝司, グラウト不良により劣化した PC 橋の調査と補修, コンクリート工学年次論文集, Vol.18, No.1, pp.1089-1094(1966).
- 11) 小林崇, 北野勇一, 花井拓, 木村嘉富, 既設 PC 橋のグラウト充填状況が PC 鋼材の腐食に与える影響, プレストレストコンクリート工学会 21 回シンポジウム論文集, pp443-448(2012).